

УДК 551.4.042

**ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ РЕЖИМА
ПАВОДКОВОГО СТОКА РЕКИ
УССУРИ С УЧЕТОМ СОВРЕМЕННЫХ
КЛИМАТИЧЕСКИХ ПРОЕКЦИЙ ДО
КОНЦА XXI ВЕКА**

Б.И. Гарцман^{1,2}, С.Ю. Лупаков^{1,2}

¹ *Институт водных проблем РАН,
Москва, Россия*

² *Тихоокеанский институт географии ДВО РАН,
Владивосток, Россия*
gartsman@inbox.ru

Аннотация. Определение реакции речных систем на климатические изменения является одной из ключевых проблем современной гидрологии. Тем более это касается Дальнего Востока России, режим увлажнения которого известен своей неустойчивостью. В настоящей статье представлены результаты оценки изменения характеристик паводкового стока рек бассейна Уссури при ожидаемых изменениях климата, связанных с глобальным потеплением.

Оценки выполнены на основе схемы динамико-стохастического моделирования, при которой на вход в гидрологическую модель подаются многочисленные ряды синтетических осадков, для перебора всевозможных условий увлажнения на водосборе. Для расчетов стока использовалась региональная гидрологическая модель паводочного цикла малого речного бассейна, ориентированная

**ASSESSMENT OF THE USSURI
RIVER FLOOD REGIME
CHANGES REGARDING TO
CLIMATE PROJECTIONS TO
THE END OF THE XXI
CENTURY**

Boris I. Gartsman^{1,2}, Sergei Yu. Lupakov^{1,2}

¹ *Water Problems Institute of RAS,
Moscow, Russia*

² *Pacific Geographical Institute of FEB
RAS, Vladivostok, Russia*
gartsman@inbox.ru

Abstract. Detecting reaction of river systems to climate changes is one of the key problems in modern hydrology. Moreover, this is the case of the Far East of Russia, where moisture regime variability is well known. The presented article deals with the assessment results of changes in the flood characteristics of the Ussuri river and its tributaries under the expected climate changes, linked with global warming. The estimates are based on dynamic-stochastic modeling scheme, in which numerous synthetic precipitation series are input to the hydrological model for searching of all kinds of humidification conditions at the investigated catchments. There was used a regional hydrological Flood

на описание процессов формирования стока летне–осеннего паводкового периода. Для задания климатического сценария использовалось объединение регионализированной стохастической модели осадков и данных расчетов по глобальным моделям климата (GCM) на последнюю треть XXI века (2071–2100 гг.).

Показано, что увеличение осадков приводит к непропорциональному отклику в исследуемых характеристиках максимального стока теплого периода года. При этом относительный рост норм максимальных расходов за сезон достигает 4–5 раз, а норм суммарного слоя стока – 2–3 раз в зависимости от варианта расчета с совмещением различных климатических моделей и сценариев. Полученные результаты согласуются с анализом данных наблюдений на основе использования так называемого «коэффициента эластичности», а также с проведенными ранее исследованиями. Таким образом, при климатических изменениях можно предполагать рост паводковой опасности в исследуемом регионе.

Ключевые слова: динамико-стохастическое моделирование; бассейн Усури; изменения климата; климатические сценарии; глобальные климатические модели

Cycle Model of small river basin that focuses on the description of runoff formation processes in the summer–autumn flood period. Climate changes input is based on the integration of the regional stochastic rainfall model and General Circulation Models (GCM) data to the end of XXI century (2071–2100).

It is shown that an increase in precipitation sum leads to an unproportional response of the evaluated flood flow characteristics. The relative increase in the mean values of the maximum flow reaches 4–5 times and 2–3 times for the seasonal runoff depth depending on applied GCM and climate scenarios. The obtained results are consistent with the analysis of observational data using the “elasticity coefficient” and previous investigations. Therefore, flood risks could be expected at the investigated territory due to climate changes.

Keywords: dynamic-stochastic modeling; the Ussuri river; climate changes; climate projections; General Circulation Models

Введение

Глобальные климатические изменения в настоящее время рассматриваются как факт, не подлежащий сомнению [IPCC, 2013], чему способствует большое количество исследований по тематике. Однако последствия быстрой смены климатических условий изучены в объеме меньшем, на который можно рассчитывать, принимая во внимание глобальный характер

вопроса. В отношении речного стока данная проблема не менее актуальна, поскольку изменения в климатической системе, вызываемые глобальным потеплением, могут приводить к значительным трансформациям режима увлажнения территорий [IPCC, 2013]. Учитывая возможность усиления мелкомасштабных эффектов на локальном уровне, изучение гидрологических последствий регионального характера приобретают дополнительную ценность.

В контексте обсуждаемой проблемы юг Дальнего Востока является достаточно сложным объектом. Это обусловлено особенностями геологического строения, ландшафтной структурой водосборов, слабым информационным обеспечением территории, чрезвычайной пространственной и временной изменчивостью процессов стокоформирования. Следует также упомянуть, что верховья крупных рек, на которые в настоящей работе сделан акцент, рассматриваются как наиболее уязвимые к климатическим изменениям [Bales et al., 2006; Zhang et al., 2016, Wu et al., 2018].

Ранее проведенное исследование [Gartsman, Lupakov, 2018] показало, что, при моделировании паводкового стока в рамках климатических проекций, в первом приближении можно ограничиться учетом осадков и испарения. Поэтому расчет режима стока выполняется на основе сценариев изменений этих двух климатических переменных.

Объекты исследования

Объектом исследования является бассейн р. Уссури с замыкающим створом у п. Кировский, в пределах которого выделены пять малых речных бассейнов (Рисунок 1, Таблица 1), рассматриваемых в качестве бассейнов–индикаторов в рамках ранее отработанной модели паводкового стока [Gartsman, Lupakov, 2017].

Климат региона – муссонный, особенностью которого является неустойчивый режим увлажнения. Нормы годовых осадков лежат в пределах 600–700 мм, 80% и более которых выпадают в виде дождей в теплый период года. Суточные максимумы осадков достигают 100–200 мм. Питание рек соответствует дальневосточному типу, с преобладанием дождевого. Основной фазой гидрологического режима можно считать летние паводки, на которые в отдельных случаях приходится до 80% и более годового стока. Рельеф среднегорный, стокоформирующие области бассейна большей частью находятся на высотах от 500 м и более. Геологическое строение разнообразно и связано с процессами формирования Сихотэ–Алиньский складчатой области. Почвенно–растительный покров представлен в основном смешанными хвойно–широколиственными лесами и лесными бурозёмами.

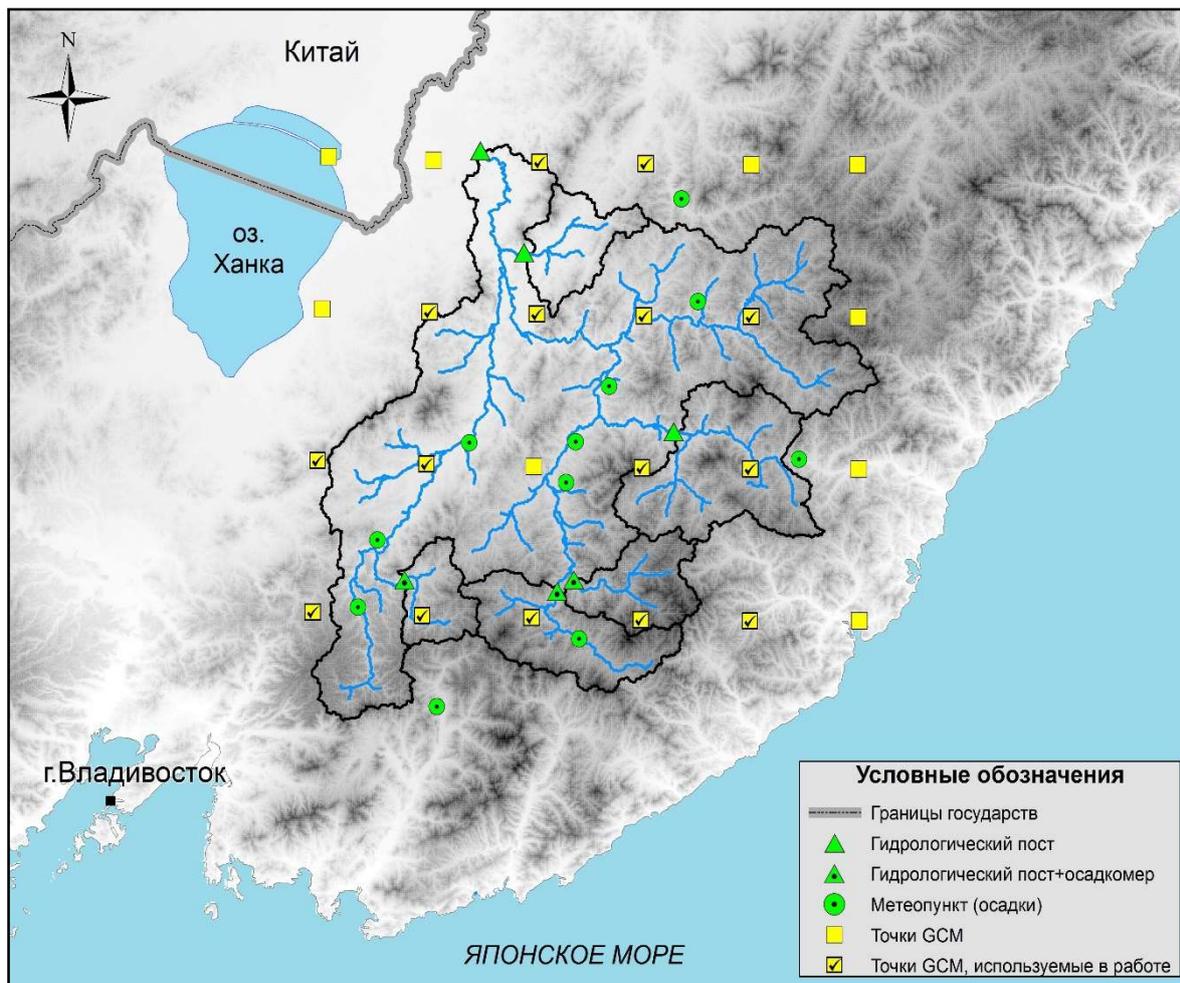


Рисунок 1. Картограмма расположения исследуемых бассейнов, пунктов наблюдений и использованных узлов расчетной сетки GCM

Figure 1. Schematic layout of the studied basins, rain gauge stations and used grid points of GCM

Таблица 1. Характеристика объектов и используемые данные

Table 1. Characteristics of the studied objects and used data

Гидрологические посты (бассейны)						
№ п/п	Река – пункт	Площадь, км ²	Высота ср., м	Уклон ср., м/100 м	Леси- стость, %	Годы наблode- ний
1	Уссури – Верх- няя Бреевка	1160	836	0,25	91	1954–1995, 1999–2013
2	Извилинка – Из- вилинка	1720	752	0,21	99	1955–1995, 1998–2013
3	Муравейка – Гродеково	2670	623	0,12	98	1970–2013
4	Крыловка – Крыловка	761	592	0,18	99	1953–2013
5	Павловка – Ан- тоновка	1070	251	0,11	82	1948–2013
6	Уссури – Киров- ский	24400	474	0,10	84	1953–2013
Метеорологические станции и посты						
№ п/п	Метеопункт	Норма осадков за год, мм	Высота, м	Годы наблюдений		
1	Виноградовка	655	110	1951–2014		
2	Верхняя Бреевка	642	–	1947–2014		
3	Гродеково	700	170	1952–2014		
4	Молчановка	677	–	1951–2014		
5	Ясное	672	–	1940–2014		
6	Каменка	672	210	1947–2014		
7	Чугуевка	694	257	1949–2014		
8	Самарка	687	319	1981–2014		
9	Кокшаровка	629	170	1948–1996, 1998–2014		
10	Извилинка	691	338	1960–2014		
11	Варфоломеевка	675	129	1960–2014		
12	Ариадное	731	124	1951–2014		
13	Кавалерово	659	265	1936–2014		

Методика исследования

Как было показано ранее [Виноградов, 1988; Гельфан, 2007; Gartsman, Lurakov, 2017], динамико–стохастическое моделирование представляет собой эффективный подход к расчету стоковых характеристик, в том числе в условиях меняющегося климата. Он основан на объединении двух подмоделей – стохастическая модель погоды подает последовательность метеоэлементов на вход гидрологической модели, выход которой затем конфигурируется в виде кривых обеспеченности стоковых характеристик.

В качестве гидрологической компоненты использовалась региональная модель паводочного цикла малого речного бассейна (Flood Cycle Model, FCM) [Гарцман, 2008], разработанная для режима с преобладанием дождевых паводков и многократно тестированная как на российских, так и зарубежных данных [Chen, Lee, Gartsman, 2008; Belyakova, Gartsman, 2018]. Модель включает небольшое количество параметров, большая часть из которых определяется на основе анализа рядов гидрометеорологических измерений, и демонстрирует хорошее и удовлетворительное качество работы – коэффициент Нэша-Сатклиффа при испытаниях на 36–ти малых реках Приморского края составил 0,64-0,91. Относительно низкие оценки качества в основном связаны с маловодными периодами, в то время как паводки в подавляющем количестве случаев имитируются с большой точностью, в соответствии с идеологией модели.

Применение FCM ограничивается размерами исследуемых бассейнов – их площадь не должна превышать первые тысячи км². Для воспроизведения и прогнозирования стока более крупных рек используется схема моделирования с бассейнами–индикаторами, в качестве которых используются малые репрезентативные речные бассейны, отражающие особенности процессов стокоформирования на определенной площади водосбора большего размера. Процесс добегания стока по речной сети с бассейнов–индикаторов моделируется на основе схемы Калинина–Милюкова, после чего все гидрографы суммируются в замыкающем створе с соответствующими весовыми коэффициентами. Параметры как FCM, так и расчетной схемы определены ранее в процессе независимой параметризации и на основе калибровки. Более подробное описание приведено в [Гарцман, 2008; Гарцман, Губарева, 2007]. Разработанные на основе описанных моделей методики краткосрочного прогноза гидрографов рек бассейнов Уссури и Буреи используются продолжительное время в региональных подразделениях Росгидромета и показывают убедительные результаты в условиях недостаточного информационного обеспечения.

Так как на выходе схемы динамико–стохастического моделирования необходимо получить кривые обеспеченности стоковых характеристик, вычислительные эксперименты выполнялись по следующему алгоритму [Gartsman, Lurakov, 2018]. На вход в стоковую модель подавались многолетние последовательности модельных суточных осадков, в результате чего формировались длительные ряды смоделированных максимальных расходов за сезон с июня по сентябрь (Q_{\max} , мм/сут) и суммарного слоя стока за тот же сезон (W_{VI-IX} , мм). Из таких рядов формировались по 200 выборок обеих характеристик такой же длины, которая имелась для каждого бассейна по фактическим данным о стоке. Для получения такого количества информации выполнялся расчет условных 15000 паводкоопасных сезонов (1 июня–30 сентября). Начальные условия для расчетов при этом задавались стохастически. Затем все выборки стоковых характеристик ранжировались и осреднялись по рангам. Модельной кривой при этом считалась осредненная, а наличие 200 выборок дало возможность построения доверительных интервалов кривых обеспеченности на уровнях надежности 5–95 и 1–99%.

Климатический вход в гидрологическую модель

Современные глобальные климатические модели (GCM)

В качестве основы для представления будущего состояния режима осадков использовались данные расчетов по 5 глобальным климатическим моделям (GCM) с использованием 4 климатических сценариев семейства RCP из проекта ISI-MIP [Warszawski et al., 2014], который подразумевает расчет климата будущего (на 2006–2100 гг.) и за «исторический период» (1961–2004). Подробное описание структуры и алгоритмов моделей можно найти на портале <https://pcmdi.llnl.gov/> или в соответствующих публикациях [Watanabe et al., 2011; Jones et al., 2011; Dunne et al., 2012; Dufresne J.–L. et al., 2013; Bentsen et al., 2013]. В сценариях RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5, связанных с различными сценариями развития общества, числа в обозначениях соответствуют увеличению суммарной величины радиационного воздействия (в Вт/м²) к 2100 г. по сравнению с 1750 г. [van Vuuren et al., 2011].

Расчетные данные GCM по осадкам даны в узлах прямоугольной сетки с шагом в 0,5 градуса по долготе и широте. Водосбор р. Уссури – п. Кировский полностью покрывается 24 точками (Рисунок 1). В настоящей работе использовались те, которые либо находятся в пределах обсуждаемых малых речных водосборов, либо в непосредственной близости. Таким образом, применение данных глобальных моделей для построения ансамблевого прогноза в

нашем случае подразумевает проведение 21 расчета (5 моделей x 4 сценария и один ансамблевый) для каждого водотока.

Для приведения данных к региональному масштабу была проведена процедура так называемого «даунскейлинга» (англ. – «downscaling») [Trzaska, Schnarr, 2014]. В настоящей работе был использован вариант так называемого delta change method, который состоит в формировании синтетических рядов метеорологических данных, основанных на введении в фактические ряды специальным образом определенной постоянной поправки («дельты»). Это было выполнено следующим образом. Были рассчитаны нормы осадков на последнюю треть XXI века (2071–2100) по модельным данным (20 вариантов, 5 GCM x 4 сценария RCP) и отнесены к расчетным нормам по тем же GCM за «исторический период», в результате определены 20 «дельт». Упомянутый временной интервал был выбран исходя из вида прогнозируемых траекторий сценариев семейства RCP – примерно до 2030 года их характеристики различаются не сильно, а более заметная разница относится ко второй половине XXI века. Диапазон изменения относительно текущего климата в таком случае составил от 116% (модель – GFDL, сценарий RCP 2.6) до 130% (модель – NorESM, сценарий RCP 8.5) суммарных осадков за сезон по отношению к сезонной норме, рассчитанной по историческим данным. Далее эта поправка («дельта», в %) вносилась в стохастическую модель осадков при разыгрывании среднесуточной нормы синтетического ряда.

Стохастическая модель осадков

Моделирование осадков в рамках описанной проекции было выполнено с помощью регионально адаптированной версии пространственно распределенного генератора погоды SFRWG (Spatial-FRagment Weather Generator) [Гельфан, Морейдо, 2015]. Данная разработка способна непрерывно моделировать несколько метеорологических переменных. В настоящей работе она была упрощена до стохастической модели осадков по группе станций, алгоритм которой включает следующие этапы: для набора метеопунктов, совокупность которых с необходимой полнотой покрывает исследуемый бассейн, высчитывается среднесуточное значение за каждый сезон. Далее каждое суточное значение осадков каждого метеопункта делится на эту норму, тем самым получается набор модульных коэффициентов, а каждый год с таким набором рассматривается как «фрагмент», который фиксирует определенную метеорологическую обстановку, состояние погоды. Количество таких «фрагментов» соответствует числу лет совместных наблюдений используемых метеопунктов. Для моделирования среднесуточное значение осадков каждого сезона разыгрывается на основе

датчика случайных чисел, затем случайным образом выбирается «шаблон» и модельные ряды каждого пункта наблюдений восстанавливаются по модульным коэффициентам.

В рамках данной работы было выполнено усовершенствование стохастической модели осадков путем учета того обстоятельства, что характер распределения дождей в сухие и увлажненные сезоны должен существенно различаться. Наиболее естественный вариант такого учета – использование классификации метеорологических ситуаций летне–осеннего периода. Однако подобных метеорологических классификаций столь длительных периодов для исследуемого региона не разработано, поэтому была использована известная гидрологическая классификация типов внутригодового распределения стока рек юга Дальнего Востока [Гарцман, Лыло, Черненко, 1974], включающая 4 типа:

- тип А, характеризуется преобладанием весеннего стока, отсутствием сильных паводков в остальную часть года;
- тип Б, которому соответствует приблизительное равенство объема стока весны и лета, которые разделены фазой пониженной водности;
- тип В, при котором отмечается 1–2 сильных паводка летне–осеннего периода;
- тип Г, появление которого сопровождается паводочным режимом стока в течении всего теплого периода.

Наше предположение состояло в том, что определенному гидрологическому типу соответствует определенная метеорологическая ситуация отдельного года, что дает возможность применить к осадкам гидрологическую классификацию. Анализ количества осадков, измеренное на различных станциях региона, подтвердил эту гипотезу, так как в годы, при которых наблюдались типы А и Б, выпадало осадков систематически меньше, чем при типах В и Г. Соответственно, типы А и Б были объединены в общий (условно названный «маловодный») тип АБ, а типы В и Г были объединены в общий (условно названный «многоводный») тип ВГ. Совместный ряд наблюдений для всех метеопунктов в пределах бассейна составил 48 лет (сезонов) или «фрагментов», распределение типов в наблюдаемых годах составило 1:1 (24 типа АБ на 24 типа ВГ). Учет данной версии классификации в модели осадков был произведен следующим образом. При разыгрывании модельного среднесуточного значения осадков, оно сравнивалось с нормой фактических осадков. Если модельная норма оказывалась больше фактической, выбирался «фрагмент» типа ВГ, в обратном случае – АБ. Такая корректировка генератора осадков практически не сказалась на сезонной норме осадков, однако максимальные суточные осадки стали моделироваться точнее в основном в зоне малых обеспеченностей (Рисунок 2, а, б).

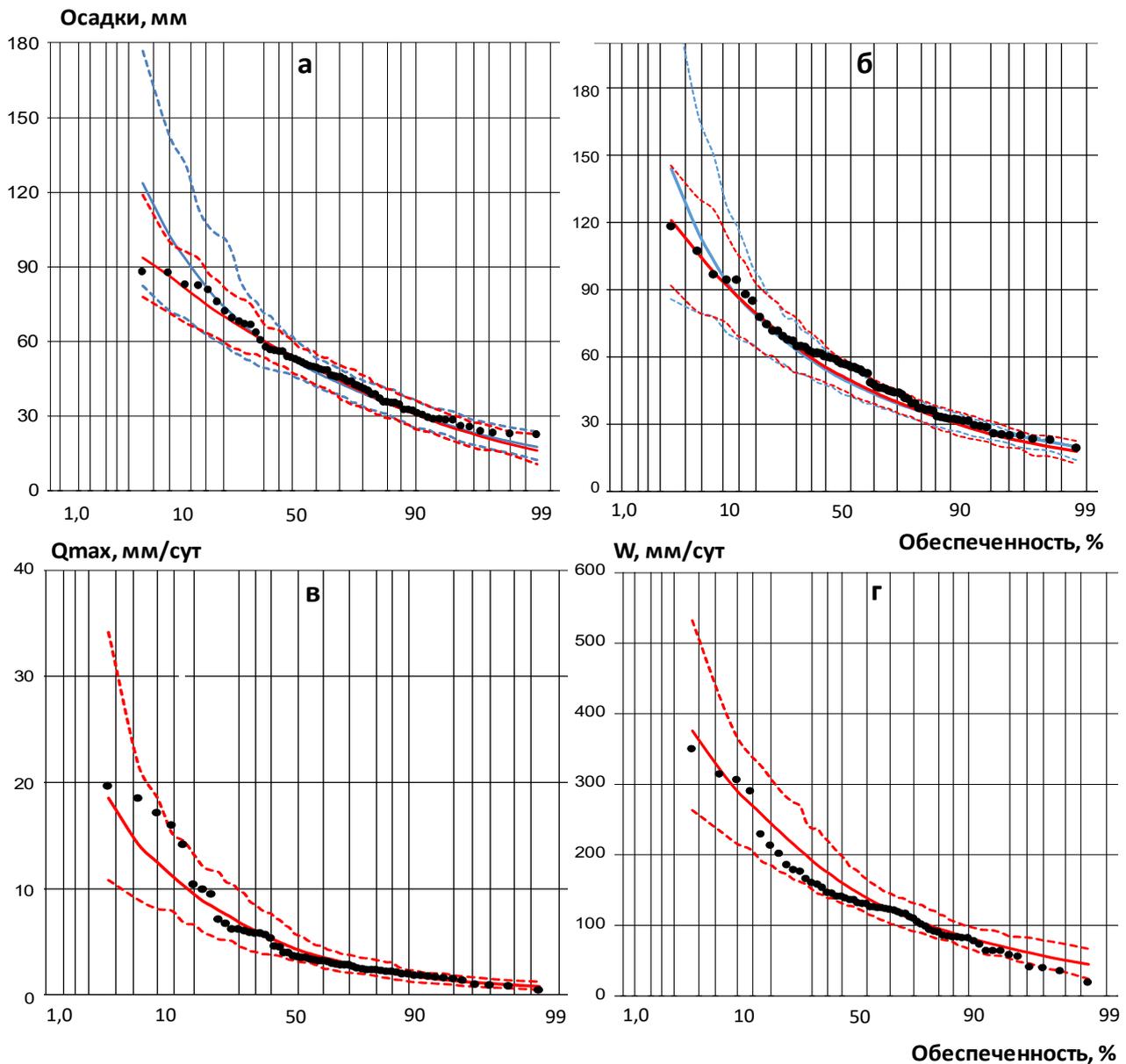


Рисунок 2. Примеры модельных кривых обеспеченности (красный цвет – с использованием усовершенствованной версии модели осадков, синий цвет – с исходной):

а, б – максимальных суточных осадков по пунктам Ясное, Верхняя Бреевка, соответственно;

в – Q_{max} , г – W_{VI-IX} по створу р. Уссури – п. Кировский.

Figure 2. Examples of calculated probability curves of (red colour – using the upgraded rainfall model, blue colour – using initial version):

а, б – maximum daily precipitation for Yasnoe rain gauge station, the same for Verkhnyaya Breyevka respectively;

в – maximum daily runoff, г – total runoff depth for the Ussuri-Kirovskiy outlet.

Пример итоговых получаемых кривых обеспеченности для замыкающего створа на «историческом» климате р. Уссури – п. Кировский представлен на Рисунке 2 (в, г). Заметно, что большая часть точек, в том числе и в зоне низких обеспеченностей, находятся в пределах достаточно жёсткого 98% доверительного интервала.

Факт повышения точности расчета осадков по усовершенствованной версии стохастической модели сказался и на стоковых характеристиках при моделировании за «исторический период». В итоге, по всей совокупности объектов, при моделировании Q_{\max} в границы оцененного доверительного интервала 98% обеспеченности попадает 88% эмпирических точек, а при отбрасывании нижнего квартиля распределения – 97%. При моделировании W_{VI-IX} в границы доверительного интервала 98% обеспеченности попадает 93% эмпирических точек, при отбрасывании нижнего квартиля 99% эмпирических точек.

Дополнительно было учтено возможное изменение испарения на расчетный период. Был вычислен тренд в рядах приземной температуры по всем используемым метеопунктам, и пересчитан в рост потенциального испарения по формуле Л. Одина [Oudin, 2005a]. Установлено, что наблюдаемый рост температур для летне–осеннего сезона вызовет рост испарения не более чем на 10% относительно текущих условий. Отметим, что чувствительность FCM к изменению испарения достаточно низкая – в пределах 10–15% от общей чувствительности к изменениям исходных данных, начальных условий расчетов и параметров модели [Gartsman, Lurakov, 2018]. Целый ряд трудностей не позволяет учесть рост испарения максимально точно, начиная с отсутствия массовых данных, заканчивая способностью моделей в принципе усваивать внедряемые методы расчета [Oudin, 2005b].

В итоге, проекционный расчет стока на последнюю треть XXI века предполагает рост нормы осадков от 16% до 30% и увеличение нормы потенциального испарения на 10% относительно текущего климата.

Результаты численных экспериментов по расчету стока

Используя многолетние ряды синтетических осадков, нами был проведен расчет гидрографов стока по всем малым рекам и замыкающему створу р. Уссури – п. Кировский по описанной выше методике. Учитывая ранее проведенные исследования [Gartsman, Lurakov, 2017], ожидался существенно больший относительный рост норм стоковых характеристик относительно изменения в нормах осадков. В целом, данное предположение подтвердилось (Рисунок 3). Нормы Q_{\max} изменяются в пределах от 131% до 264% по сравнению с нормами «исторического периода», нормы W_{VI-IX} – соответственно, от 124% до 163%. Сценарный рост

норм сезонных осадков существенно меньше, отношения роста отклика гидрологических характеристик на рост входного воздействия (все в %) в некоторых вариантах расчетов достигает 5 раз и более.

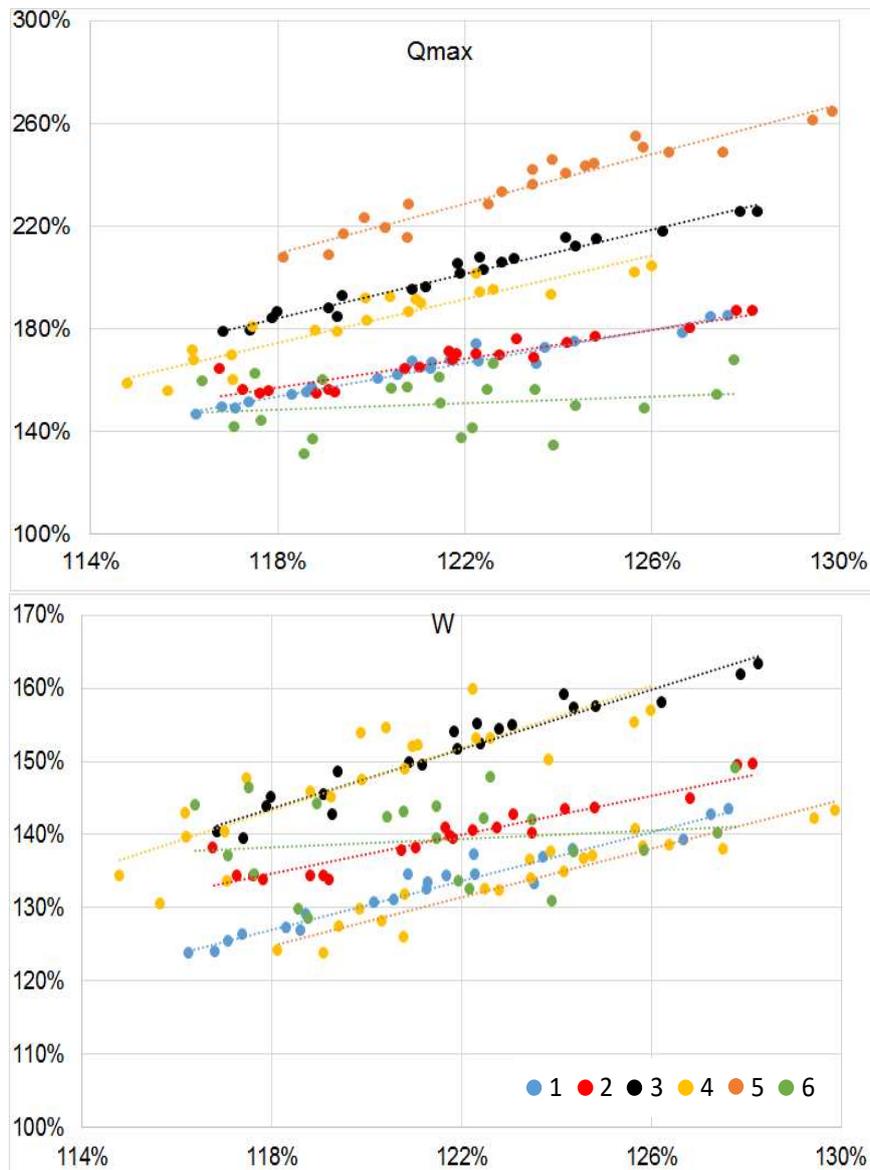


Рисунок 3. Связь изменения норм осадков (моделированные/«исторический» период – по оси абсцисс) с изменениями характеристик стока (моделированный/«исторический» период – по оси ординат). Каждой точке соответствует вариант расчета с различным сочетанием GCM и RCP на период с 2071 по 2100 гг., а также ансамблевый расчет (всего 21 расчет для каждого объекта). Цветом обозначены разные бассейны, нумерация – как в Таблице 1.

Figure 3. Relation between changes of mean precipitation (modeled/“historical” – X-axis) and flow characteristics (modeled/“historical” – Y-axis). Each point represents calculation with applying of different GCM and RCP for 2071-2100 and ensemble one (in total 21 for each objects). Different color marks different objects with numbering as presented in Table 1.

Физическое объяснение этого факта, по-видимому, состоит в том, что при увеличении валового количества осадков, потери различного рода (на заполнение бессточных понижений, полостей внутри почвы и т.п.) относительно сокращаются, а коэффициент стока существенно возрастает. В используемой гидрологической модели это достигается за счет существования двух различных режимов стокоформирования. При первом сток образуется за счет подповерхностного движения влаги, то есть достаточно медленно, и со значительной долей потерь; при втором – формируется 100%-й поверхностный сток. Увеличение частоты и продолжительности действия второго режима стокоформирования при увеличивающемся количестве осадков резко усиливает бассейновый отклик.

С точки зрения формирования паводков и опасностей, связанных с ними, интересны значения стоковых характеристик различной обеспеченности. Рассмотрим значения квантилей 1% и 5% обеспеченности максимального расхода Q_{\max} , которые также демонстрируют заметный рост. Рисунок 4 отражает отношение Q_{\max} 1%-ой обеспеченности, полученных в отдельных вариантах расчетов, к рассчитанному за «исторический период». В ряд выстроены 21 вариант расчета, соответствующих различным сочетаниям моделей и сценариев (5 GCM x 4 RCP + 1 ансамблевый).

Видно, что по всем вариантам расчетов события, происходящие раз в 100 лет, становятся более масштабными – рост отмечается на уровне от 19% до 86% относительно «исторического периода». В другой формулировке, при рассматриваемых сценариях существенно возрастают вероятности прохождения паводков с некоторыми фиксированными значениями максимальных расходов. В то же время динамика, например, модельных оценок W_{VI-IX} 5% обеспеченности отличается от Q_{\max} в сторону относительно меньшего роста и большего разброса между разными бассейнами рек – для замыкающего створа р. Уссури – п. Кировский изменение W_{VI-IX} 5% обеспеченности относительно текущего климата практически отсутствует.

Заключение

Очевидно, что степень доверия получаемым оценкам гидрологического характера в первую очередь определяется качеством работы климатических моделей. На текущий момент, примененные решения в области получения модельных осадков рассматриваются как наиболее правдоподобные, с учетом всех ограничений, на последнюю треть XXI в.

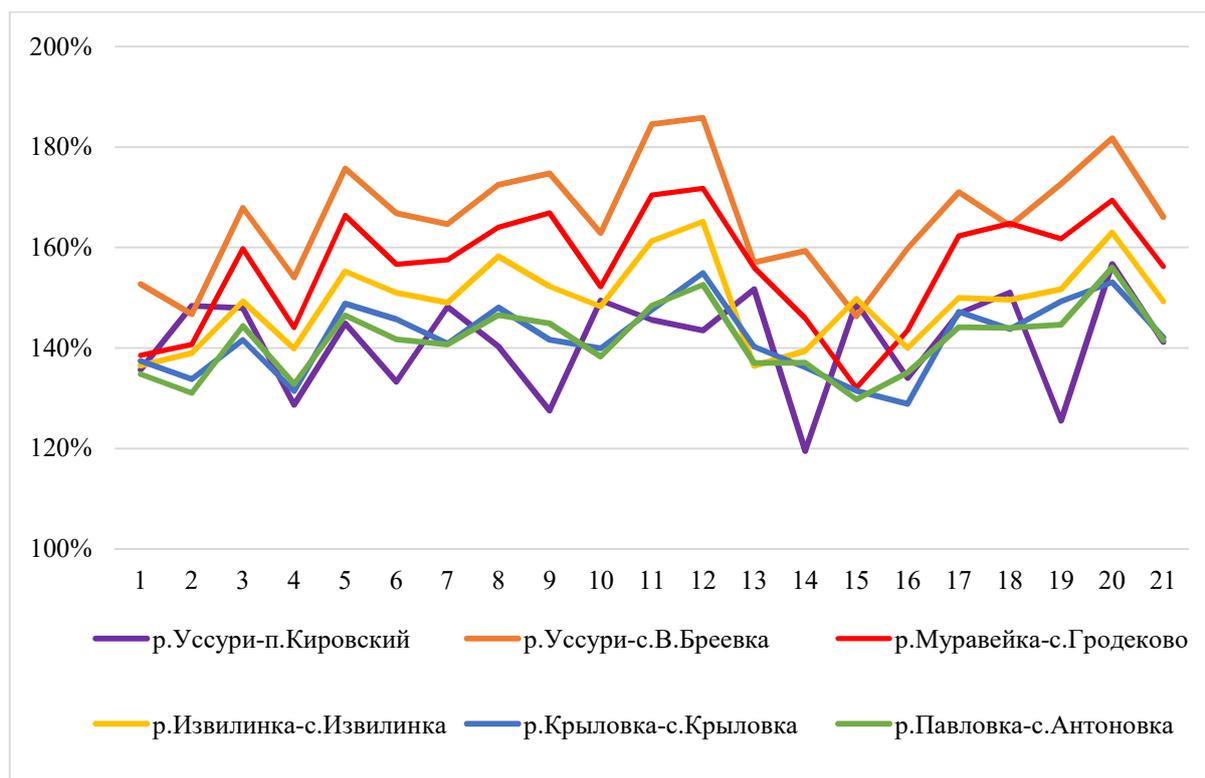


Рисунок 4. Изменение значений максимальных расходов 1% обеспеченности относительно текущих условий по различным вариантам расчета на период 2071–2100 гг. на всех используемых створах

Figure 4. Changes of the maximum daily runoff values of 1% occurrence probability against present conditions with respect to the period of 2021-2100 at the studied objects

Выполненные расчеты для водосборов дальневосточных рек с использованием различных источников климатического входа в стоковую модель показывают сложную динамику взаимодействия основных элементов водного баланса. При этом нормы исследуемых стоковых характеристик растут весьма значительно, превышая в относительном (процентном) выражении ожидаемый рост осадков. Полученные оценки указывают на существенное увеличения паводковой опасности в регионе. Эта тенденция прослеживается и при анализе фактических данных. Например, в зарубежной практике популярным инструментом для этого является коэффициент «эластичности» стока по осадкам [Sankarasubramanian, Vogel, Limbrunner, 2001]:

$$*\varepsilon(P, Q) = \text{median} \left(\frac{Q_t - \bar{Q}}{P_t - \bar{P}} * \frac{\bar{P}}{\bar{Q}} \right) \quad (1),$$

где Q_t – суммарный слой стока за конкретный сезон,

P_t – сумма осадков за тот же период,

\bar{Q} и \bar{P} соответствующие многолетние нормы.

Данный показатель отражает изменение выбранной характеристики стока в ответ на 1% изменения осадков. По результатам его применения для нескольких малых речных бассейнов в пределах бассейна р. Уссури – п. Кировский за период от начала 1950–х до 2013 г. этот коэффициент принимает значения от 1,2 до 3,3. Таким образом, полученные оценки при использовании методов моделирования и анализа фактического материала близки или, как минимум, одного порядка.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ, проект № 17-77-3006 и РФФИ № 19-05-00326.

Acknowledgments

This study was supported by the Russian Science Foundation, project no. and 17-77-30006, and by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 19-05-00326.

Литература

Виноградов Ю.Б. Математическое моделирование процессов формирования стока. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 311 с.

Гарцман Б.И. Дождевые наводнения на реках юга Дальнего Востока: методы расчетов, прогнозов, оценок риска. Владивосток: Дальнаука, 2008. 421 с.

Гарцман Б.И. Губарева Т.С. Прогноз гидрографа дождевых паводков на реках Дальнего Востока // Метеорология и гидрология. 2007. № 5. с. 70-80.

Гарцман И.Н. Лыло В.М. Черненко В.Г. Паводочный сток рек Дальнего Востока. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 264 с.

References

Bales R., Molotch N., Painter Th., Dettinger M., Rice R., Dozier J. Mountain hydrology of the western United States. *Water Resources Research*, 2006, vol. 42, iss. 8, W08432. DOI: [10.1029/2005WR004387](https://doi.org/10.1029/2005WR004387)

Belyakova P.A. Gartsman B.I. Possibilities of Flood Forecasting in the West Caucasian Rivers Based on FCM Model. *Water Resources*, 2018, vol. 45, suppl. 1, pp. 50-58. DOI: [10.1134/S0097807818050317](https://doi.org/10.1134/S0097807818050317)

Bentsen M. et al. The Norwegian Earth system model, NorESM1-M - Part 1: Description and basic evaluation of the physical climate. *Geoscientific Model Development*, 2013, vol. 6, pp. 687-720. DOI: [10.5194/gmdd-5-2843-2012](https://doi.org/10.5194/gmdd-5-2843-2012)

- Гельфан А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. М.: ИВП РАН, 2007. 294 с.
- Гельфан А.Н. Морейдо В.М. Описание макромасштабной структуры поля снежного покрова равнинной территории с помощью динамико-стохастической модели его формирования // Лёд и Снег. 2015. Т.55. № 4. с. 61-72.
- Bales R., Molotch N., Painter Th., Dettinger M., Rice R., Dozier J. Mountain hydrology of the western United States // Water Resources Research. 2006. V. 42. Iss. 8. W08432. DOI: [10.1029/2005WR004387](https://doi.org/10.1029/2005WR004387)
- Belyakova P.A. Gartsman B.I. Possibilities of Flood Forecasting in the West Caucasian Rivers Based on FCM Model // Water Resources. 2018. V. 45 (Suppl. 1). P. 50-58 DOI: [10.1134/S0097807818050317](https://doi.org/10.1134/S0097807818050317)
- Bentsen M. et al. The Norwegian Earth system model, NorESM1-M – Part 1: Description and basic evaluation of the physical climate // Geoscientific Model Development. 2013. Vol. 6. P. 687-720. DOI: [10.5194/gmdd-5-2843-2012](https://doi.org/10.5194/gmdd-5-2843-2012)
- Chen N.Ch. Lee K.T. Gartsman B.I. Application of Flood Cycle Model for daily flow simulating in different climate area // Taiwan Water Conservancy. 2008. Vol. 56. No. 2. P. 1-13.
- Chen N.Ch. Lee K.T. Gartsman B.I. Application of Flood Cycle Model for daily flow simulating in different climate area. *Taiwan Water Conservancy*, 2008, vol. 56, no 2, pp. 1-13.
- Dufresne J.-L. et al. Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5. *Climate Dynamics*, 2013, vol. 40, iss. 9-10, pp. 2123-2165. DOI: [10.1007/s00382-012-1636-1](https://doi.org/10.1007/s00382-012-1636-1)
- Dunne J. et al. GFDL's ESM2 Global Coupled Climate-Carbon Earth System Models. Part I: Physical Formulation and Baseline Simulation Characteristics. *Journal of Climate*, 2012, vol. 25, no. 19, pp. 6646-6665. DOI: [10.1175/JCLI-D-11-00560.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00560.1)
- Gartsman B.I. *Dozhdevye navodneniya na rekah Dalnego Vostoka: metody raschetov, prognozov, otsenki riska [Rainfall Floods in the Rivers of the Far East: Calculation, Forecasting, and Risk Assessment Methods]*. Vladivostok: Publ. Dalnauka, 2008. 421 p. (In Russian)
- Gartsman B.I. Gubareva T.S. Prognoz gidrografa dozhdevykh pavodkov na rekah Dal'nego Vostoka [Forecast of the rainfall flood hydrograph on the Far East rivers] // *Meteorologiya i gidrologiya [Meteorology and hydrology (Russia)]*, 2007, no. 5, p. 70-80. (In Russian; abstract in English)
- Gartsman B.I. Lupakov S.Yu. Effect of climate changes on the maximal runoff in the Amur Basin: Estimation based on dynamic-stochastic simulation. *Water Resources*, 2017, vol. 44, iss. 5, pp. 697-706. DOI: [10.1134/S0097807817050062](https://doi.org/10.1134/S0097807817050062)

Dufresne J.-L. et al. Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5 // *Climate Dynamics*. 2013. V. 40. Iss. 9-10. P. 2123-2165. DOI: [10.1007/s00382-012-1636-1](https://doi.org/10.1007/s00382-012-1636-1)

Dunne J. et al. GFDL's ESM2 Global Coupled Climate-Carbon Earth System Models. Part I: Physical Formulation and Baseline Simulation Characteristics // *Journal of Climate*. 2012. Vol. 25. No. 19. P. 6646-6665. DOI: [10.1175/JCLI-D-11-00560.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00560.1)

Gartsman B.I. Lupakov S.Yu. Effect of climate changes on the maximal runoff in the Amur Basin: Estimation based on dynamic-stochastic simulation // *Water Resources*. 2017. Vol. 44. Iss. 5. P. 697-706. DOI: [10.1134/S0097807817050062](https://doi.org/10.1134/S0097807817050062)

Gartsman B.I. Lupakov S.Yu. Changes in the maximum runoff regime in the Ussuri River basin: the methodological aspects of forecasting based on dynamic-stochastic simulation // *Water Resources*. 2018. Vol. 45. Suppl. 1. P. S79-S89. DOI: [10.1134/S0097807818050342](https://doi.org/10.1134/S0097807818050342)

IPCC: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge,

Gartsman B.I. Lupakov S.Yu. Changes in the maximum runoff regime in the Ussuri River basin: the methodological aspects of forecasting based on dynamic-stochastic simulation. *Water Resources*, 2018, vol. 45, suppl. 1, pp. S79-S89. DOI: [10.1134/S0097807818050342](https://doi.org/10.1134/S0097807818050342)

Gartsman I.N. Lylo V.M. Chernenko V.G. *Pavodchnyj stok rek Dal'nego Vostoka [Flood flow of the Far Eastern rivers]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1971. 264 p. (In Russian)

Gelfan A.N. *Dinamiko-stohasticheskoye modelirovaniye formirovaniya talogo stoka [Dynamic—Stochastic Simulation of Snowmelt Runoff Formation]*. Moscow: Publ. of Institute of Water Problems RAS, 2007. 294 p. (In Russian)

Gelfan A.N. Moreydo V.M. Opisanie makromasshtabnoj struktury polja snezhnogo pokrova ravninnoj territorii s pomoshh'ju dinamiko-stohasticheskoy modeli ego formirovaniya [Describing macro-scale structure of the snow cover by a dynamic-stochastic model]. *Led i sneg [Ice and snow (Russia)]*, 2015, vol. 55, no. 4, pp. 61-72. (In Russian; abstract in English)

IPCC: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge, United Kingdom and

- United Kingdom and New York. 2013. 1535 p.
- Jones C.D. et al.* The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations // *Geoscientific Model Development*. 2011. Vol. 4. Iss. 3. P. 543-570. DOI: [10.5194/gmd-4-543-2011](https://doi.org/10.5194/gmd-4-543-2011)
- Oudin L., Hervieu F., Michel C., Perrin C., Andreassian V., Anctil F., Loumagne C.* Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 2: Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling // *Journal of Hydrology*. 2005a. Vol. 303. Iss. 1-4. P. 290-306. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2004.08.026](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.026)
- Oudin L. Michel C. Anctil F.* Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 1 - Can rainfall-runoff models effectively handle detailed potential evapotranspiration inputs? // *Journal of Hydrology*. 2005b. Vol. 303. Iss. 1-4. P. 275-289. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2004.08.025](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.025)
- Sankarasubramanian A., Vogel R.M., Limbrunner J.F.* Climate elasticity of streamflow in the United States // *Water Resources Research*. 2001. Vol. 37. Iss. 6. P. 1771-1781. DOI: [10.1029/2000WR900330](https://doi.org/10.1029/2000WR900330)
- Trzaska S. Schnarr E.* A review of downscaling methods for climate change projections (Technical report, United States Agency for New York, Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
- Jones C.D. et al.* The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations. *Geoscientific Model Development*, 2011, vol. 4, iss. 3, pp. 543-570. DOI: [10.5194/gmd-4-543-2011](https://doi.org/10.5194/gmd-4-543-2011)
- Oudin L., Hervieu F., Michel C., Perrin C., Andreassian V., Anctil F., Loumagne C.* Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 2: Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology*, 2005a, vol. 303, no. 1-4. pp. 290-306. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2004.08.026](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.026)
- Oudin L. Michel C. Anctil F.* Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 1 - Can rainfall-runoff models effectively handle detailed potential evapotranspiration inputs? *Journal of Hydrology*, 2005b, vol. 303, no. 1-4, pp. 275-289. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2004.08.025](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.025)
- Sankarasubramanian A., Vogel R.M., Limbrunner J.F.* Climate elasticity of streamflow in the United States. *Water Resources Research*, 2001, vol. 37, iss. 6, pp. 1771-1781. DOI: [10.1029/2000WR900330](https://doi.org/10.1029/2000WR900330)
- Trzaska S. Schnarr E.* A review of downscaling methods for climate change projections (Technical report, United States Agency for International Development). Burlington, Vermont, Tetra Tech ARD, 2014. 56 p.

International Development). Burlington, Vermont: Tetra Tech ARD. 2014. 56 p.

van Vuuren D.P. et al. The representative concentration pathways: an overview // *Climatic Change*. 2011. Vol. 109. P. 5-31. DOI: [10.1007/s10584-011-0148-z](https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z)

Warszawski L., Frieler K., Huber V., Piontek F., Serdeczny O., Schewe J. The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP): project framework // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2014. Vol. 111. Iss. 9. P. 3228-3232. DOI: [10.1073/pnas.1312330110](https://doi.org/10.1073/pnas.1312330110).

Watanabe S. et al. MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5 experiments // *Geoscientific Model Development*. 2011. Vol. 4. P. 845-872. DOI: [10.5194/gmdd-4-1063-2011](https://doi.org/10.5194/gmdd-4-1063-2011)

Wu Y., Zhang G., Shen H., Jun Xu Y. Nonlinear Response of Streamflow to Climate Change in High-Latitude Regions: A Case Study in Headwaters of Nenjiang River Basin in China's Far Northeast // *Water*. 2018. Vol. 10. No. 3. 294. DOI: [10.3390/w10030294](https://doi.org/10.3390/w10030294)

Zhang A., Liu W., Yin Zh., Fu G., Zheng Ch. How will climate change affect the water availability in the Heihe River basin, northwest China? // *Journal of Hydrometeorology*. 2016. Vol. 17. No. 5. P. 1517-1542. DOI: [10.1175/JHM-D-15-0058.1](https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0058.1)

van Vuuren D.P. et al. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 2011, vol. 109, pp. 5-31. DOI: [10.1007/s10584-011-0148-z](https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z)

Vinogradov Yu.B. *Matematicheskoye modelirovaniye protsessov formirovaniya stoka [Mathematical Modeling of River Runoff Formation Processes]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1988. 311 p. (In Russian)

Warszawski L., Frieler K., Huber V., Piontek F., Serdeczny O., Schewe J. The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP): project framework. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, vol. 111, iss. 9, pp. 3228-3232. DOI: [10.1073/pnas.1312330110](https://doi.org/10.1073/pnas.1312330110).

Watanabe S. et al. MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5 experiments. *Geoscientific Model Development*, 2011, vol. 4, pp. 845-872. DOI: [10.5194/gmdd-4-1063-2011](https://doi.org/10.5194/gmdd-4-1063-2011)

Wu Y., Zhang G., Shen H., Jun Xu Y. Nonlinear Response of Streamflow to Climate Change in High-Latitude Regions: A Case Study in Headwaters of Nenjiang River Basin in China's Far Northeast. *Water*, 2018, vol. 10, no. 3, pp. 294-311. DOI: [10.3390/w10030294](https://doi.org/10.3390/w10030294)

Zhang A., Liu W., Yin Zh., Fu G., Zheng Ch. How will climate change affect the water availability in the Heihe River basin, northwest China? *Journal of Hydrometeorology*, 2016, vol. 17, no. 5, pp. 1517-1542. DOI: [10.1175/JHM-D-15-0058.1](https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0058.1)